

福島原発のトリチウム汚染水（1） ---- 何が問題か

2021年6月13日

河田昌東（NPO 法人チェルノブイリ救援・中部）

はじめに

事故から10年経った今も続いている福島第一原発の放射能汚染水問題は今後も簡単には解決出来そうにない。その大きな原因は「トリチウム」にある。東電の発表では事故直後の2011年5月～2013年7月にかけて海に流出したトリチウム量は約20～40兆ベクレル（ $2\sim4\times 10^{13}\text{Bq}$ ）で、この中には事故直後に流出した高濃度の汚染水や東電が意図的に放出した汚染水中のトリチウムは含まれていない。現在1200個のタンクに貯蔵されている汚染水120万トンに含まれるトリチウムは860兆Bq（ 8.6×10^{14} ）で、今なお毎日150トン増え続けている。東電と政府はこれを基準以下に薄めて海洋放出するという。何が問題か。

（1）トリチウムって何？

トリチウム（Tritium：略号T）の和名は三重水素と呼ばれ化学的性質は水素（H）と同じである。水素は原子核に一個の陽子（P）、その周りを一個の電子（e）が回っている最も小さい安定元素である。トリチウムは原子核に一個の陽子（1P）の他に2個の中性子（2N）を含み（1P2N）、不安定なため中性子の1個が電子を放出して陽子に変化し、原子核に2個の陽子（2P）と1個の中性子（N）を含む（2P1N）新しい元素（ヘリウム2： 2He ）になって安定化する。この時放出される電子がベータ線（ β 線）である。トリチウムの半減期は12.3年である。原子炉の中では、冷却水（ H_2O ）に僅かに含まれる重水（ H-O-D ）の重水素（D）の原子核に中性子が取り込まれたり、不純物のトリチウムや加圧水型原発の冷却水に含まれるホウ素という物質が分解したりしてトリチウムが出来る。従って、原子炉の冷却を続ける限りトリチウムは新たに生産され続けることになる。一方、我々が生きている生活圏でもトリチウムは存在する。過去の核実験や宇宙線の影響で、地球上の水の中には1～2Bq/L程度のトリチウムが含まれている。

（2）トリチウムは何故除去出来ない？

化学的性質が水素と同じで、トリチウム（T）を含む水（ T-O-H ）と通常の水（ H-O-H ）が

区別出来ないからである。セシウム137やストロンチウム90など多くの放射性物質の除去には、その元素の化学的性質を利用し吸着や濾過などを行い除去する。しかし、通常の水とトリチウムを含む水はこうした方法では区別できず除去できない。その結果、沸騰水型原発では原子炉内で年間2兆Bq（ 2×10^{12} ）、加圧水型原発（PWR）では87兆Bq（ 8.7×10^{13} ）のトリチウムが生成されるが、その殆どを放出可能な海洋放出基準が定められている（濃度では60000Bq/L）。余談だが、青森県六ヶ所村の再処理工場が通常に稼働すれば、年間1900兆Bq（ 1.9×10^{15} ）を大気中に、1.8京Bq（ 1.8×10^{16} ）を海中に放出する予定である。トリチウムの放出基準は事実上存在せず、現実追認でありそれが根本的な問題である。

（3）トリチウムの何が問題か

トリチウム水は通常の水と同様、経口や呼吸、皮膚を通じて体内に入る。体内でも普通の水と同様に血液や体液を通じて細胞内の様々な代謝反応に関与し、タンパク質や遺伝子（DNA）の中の水素に取って代わりその成分として入り込む。体内で水として存在する場合は新たに入ってくる水に置きかわり体外に排出される（生物学的半減期は12日）が、細胞の構成成分として取り込まれたトリチウムは容易に代謝されず、その分子が分解されて水になるまで

長時間留まり（放射線生物学者ロザリー・バーテルによると少なくとも15年以上）、ベータ線を出し続けることになる。盛んに細胞分裂する若い細胞ではより多くのトリチウムを成分として取り込む。体内の有機物に取り込まれたトリチウムは有機結合型トリチウム OBT (Organic Bound Tritium) と呼ばれ、セシウムのように単に元素として体内に存在し放射線を出す放射能とは区別が必要である。しかし国際放射線防護委員会 (ICRP) はこの点を過小評価している。トリチウムを出すベータ線はエネルギーが極めて小さく、外部被曝は殆ど問題にならないが、こうして体内に取り込まれると、全てのベータ線は内部被曝の原因になる。

(4) DNA に取り込まれたトリチウムの問題
トリチウムは遺伝子 DNA の中の酸素や炭素、窒素、リン原子と結合し、化学的には通常の水素原子と同じ振る舞いをするが、半減期とともに電子（ベータ線）を放出して周囲を内部被曝させ様々な分子を破壊する。しかし、それだけではない。トリチウムが壊れヘリウム原子に変わると、トリチウムと結合していた炭素や酸素、窒素、リン等の原子とトリチウムとの化学結合（共有結合）が切断する。ヘリウムは全ての元素の中で最も安定な元素で他の元素とは結合しないからである。その結果 DNA を構成している炭素や酸素、窒素、リン原子は不安定になり、DNA の化学結合の切断が起こる。このように、トリチウムの効果は崩壊時に出すベータ線の被曝だけではなく、一般的な放射性物質による照射被曝とは異なる次元の、構成元素の崩壊という分子破壊をもたらすのである。いわゆる照射被曝は確率論的現象だが、DNA の破壊はトリチウムの崩壊と共に 100% 起こる。

(5) トリチウム汚染で起こること
核実験が始まる 1950 年代以降、トリチウムの生物学的影響に関する研究は数多く行われている。最も広く知られているのは染色体の切断などの異常である。人リンパ球を使った実験ではトリチウム水に晒されると 3700Bq/ml

位から染色体異常が起こり、370 万 Bq/ml ではほぼ全ての細胞で染色体が壊れる。DNA の構成要素の一つチミジンの水素をトリチウムで置換した場合、37Bq/ml 位から染色体の異常が始まり 19 万 Bq/ml の濃度では 100% の細胞が染色体異常を起こす（堀、中井：1976 年）。このように有機結合型トリチウム OBT の危険性は通常の放射能による被曝とは次元が違う。生体次元での研究も数多くあり、染色体異常（突然変異）の結果、致命的なガンなどの健康障害が指摘されている。特に問題なのは子宮内胎児への影響である。トリチウム水やトリチウムを含む体内の分子は、胎盤が通常の水や分子と識別出来ないため、そのまま胎児の細胞に取り込まれる。その結果、胎児に異常が起こり、死産や早産、流産などの他、様々な先天異常などの原因になる。米国カリフォルニア州のローレンス・リバモア国立核研究所の T. ストラウムらの研究（1991～1993）ではトリチウムによる催奇形性の確率は致死性ガンの確率の 6 倍にのぼる。カナダのオンタリオ湖はカナダ特有の重水原子炉から出る大量のトリチウムによる汚染が知られている。その結果、周辺地域で 1978～1985 年の間に出産異常や流死産の増加が認められ、ダウン症候群が 1.8 倍に増加し、胎児の中樞神経系の異常も確認された（カナダ国立原子力エネルギー規制委員会報告 1991 年）。

また最近明らかになった重大な事実がある。英国の核燃料加工施設でトリチウムを扱う作業に従事した 34 名について調査したところ、平均被曝線量が γ 線は 1.94mSv (ミリシーベルト)、トリチウムによる β 線被曝が 9.33mSv しかなかったにもかかわらず、血液中リンパ球の染色体異常が多発していた。

このように、トリチウムは放射線のエネルギーが低いためにその影響が過小評価されがちだが、ベータ線被曝だけでなく、生体分子の構成成分の破壊を通じて、他の放射性物質とは全く異なる生物への影響もたらすことが大きな問題である。

福島原発のトリチウム汚染水（2） ---- その処理技術について

2021年6月13日

河田昌東（NPO 法人チェルノブイリ救援・中部）

トリチウムを含む水は通常の水（軽水）と化学的性質は同じなので化学処理は困難だが、物理的性質は大きく違う。その違いを利用すれば処理は可能である。例を挙げると、原爆や原発の燃料に使われるウラン 235（U235）は天然ウラン（U238）に 0.7%含まれる。化学的性質は同じで質量が 1.2%しか変わらない両者を分離精製し、U235 を 100%に濃縮すれば原爆に、5%に濃縮すれば原発の燃料になる。現実に使われているこの技術は当然と疑いもしない。それに比べれば軽水とトリチウム水の物理的性質の違いははるかに大きく、軽水の質量（H₂O は 18、T₂O は 22）の違いを利用すれば両者は分離精製可能である。現在貯蔵中の 860 兆 Bq のトリチウム汚染水は、もし 100%に濃縮出来れば理論的には H₂O はたったの 15.9g、T₂O は 8.8g にしかならない。仮にこの千倍薄いとしても百年や千年の間安全に保管するには何の問題もない。世界の原子力産業界がそれをやらなかったのは単に膨大なコストがかかる為である。

● 軽水とトリチウム水の物理的性質の違い

軽水（H₂O）とトリチウム水（T₂O）の物理的違いを表に示す。要約すればトリチウム水は軽水と比べて 1.2 倍重く、沸点は 1.5℃高い。軽水は 0℃で凍るがトリチウム水は 4.48℃で凍る。こうした違いを利用して様々な分離精製技術が開発されている。以下に幾つかの例を紹介する。

性質	H ₂ O	T ₂ O
質量	18.02	22.03
密度 (g/ml)	1.0	1.21
沸点 °C	99.97	101.5
融点 °C	0.0	4.48

(1) GE 日立核エネルギー・カナダ（株）は沸点の違いを利用した軽水とトリチウム水の分離技術を開発している。カナダの原発は炉心冷却に重水（D₂O）を使うので、排水にトリチウムが大量に含まれ、大きな問題になってきた。同社はカナダのダーリントン原発の排水をこの方法で一部処理している実績がある。同社は福島原発のトリチウム汚染水を一日 500 トン処理する設備を設計し、それに必要な電力は 2.5~4 万キロワットと計算している。これが事実なら 120 万トンの汚染水を 6 年半で処理できる。

(2) アメリカのニュークリア・ソリューション（株）は、軽水とトリチウム水の融点の違いを利用した分離技術を開発し、特許（日、米、欧）を取得している。軽水は 0℃で凍り、トリチウム水は 4.5℃で凍るので、0~1℃に冷やした円錐形の容器の表面に汚染水を流せばトリチウム水は容器表面に凍り付き軽水はそのまま流下する。これを繰り返せばトリチウム水の氷が分離できる、というアイデアである。

(3) 近畿大学と東洋アルミ（株）はアルミニウム粉末を焼結して作った特殊な多孔質フィルター

を開発した。トリチウム水を含む蒸気をこのフィルターに通すと軽水はフィルターを通り抜けるがトリチウム水はほぼ 100%フィルターに残る、という。軽水とトリチウム水の質量の違いを利用したこの技術を実用化・大規模化できれば、福島汚染水を海洋放出しなくても良くなる。

(4) 京都大学の研究者らは酸化マンガンの特殊な結晶構造（スピネル型）をもつ化合物が、室温下でトリチウム水を酸化分解し、トリチウムイオン（ T^+ ）を吸着し水素イオン（ H^+ ）を放出する、という性質を利用して汚染水の処理が出来る事を実証した。

(6) アメリカのキュリオン（株）はトリチウムを含む水を電気分解し、ガス状の水素とトリチウム、酸素に分離し、特殊な反応塔を通過させるとトリチウム・ガスは少量の水に吸収され、水素と酸素は分離される。こうした反応を繰り返してトリチウム水だけを濃縮する。同社はこの実証実験に基づいて福島原発の汚染水の1日400トン処理に必要な設備面積、費用、処理期間運転費用などを提案している。

他にも様々な処理技術が提案されている。国の国際廃炉研究技術開発機構の汚染水技術調査チームは2013年に福島原発の汚染水対策に関する国際的な技術提案を募集した。その報告によるとトリチウム汚染水の処理に関して世界中から182件の応募があった。しかし同チームはこれらの提案を詳しく検討することなく、全てはまだ実験段階だと判断し現実的な対策は海洋放出しかないと結論した。東電と国のこのような姿勢の背景にあるのは、世界中の原発で排水中のトリチウムを処理している国はなく、福島原発で処理が出来るとなれば原発の運転に関して国際的な影響が大きいことが挙げられる。また、今後稼働予定の青森県六ヶ所村再処理工場は、もし稼働すればトリチウム汚染水の排出量は福島原発で貯蔵中汚染水のトリチウムの20倍を年間排出する予定である。国は勿論その処理を行うつもりはない。排水中のトリチウム処理には当然過大なコストが必要であり、原発の経済性はますます否定的評価に傾くことは疑いない。

最後に

原発のトリチウム排水問題はある面で地球温暖化の問題によく似ている。温暖化の原因、炭酸ガスは自然界に大量に存在し、多少の増加があっても環境への影響は無視できる、という考えが従来は支配的であった。しかしこうした楽観論を覆えす自然災害が近年多発するようになり、再生可能エネルギーの技術も進んだことから脱炭素論が経済界も含めて支配的になった。しかし現実的な対策が気候変動に追いつくかはまだ分からない。

トリチウムは過去の大気中核実験により大気や河川、海水の汚染が高い時代があった。それが国連の大気圏内核実験禁止条約締結（1963年）によりすべてが地下核実験になり、大気中や水中の濃度は大幅に低下した。また、宇宙線によるトリチウムの生成で現在も海水中に1~2Bq/L存在する。更に他の核廃棄物と比べエネルギーが小さく生物的影響は小さい、と考えられてきた。これに核燃料再処理や原発で排出されるトリチウムが追加されたとしても大きな影響はないだろうとの楽観論が現在も支配的である。

しかしこのままの状況が続けば世界の環境中のトリチウム濃度が増加するのは避けられない。特に核燃料再処理が始まれば、桁違いな汚染が生ずる。地球の海の汚染が広がればすれば海産物の汚染は避けられない。我々はそれを食べざるを得ない状況で暮らすことになる。我々は今出来る事をやらなければならない。それが未来世代への責任である。